

电镀阻隔层对钛/钢电子束焊接接头性能的影响

王亚荣, 樊亚丽, 余 洋

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 采用电子束熔化焊、电子束阻隔焊和电子束阻隔熔-钎焊方法来实现钛合金与不锈钢异种金属之间的连接。研究发现钛合金与不锈钢连接界面处产生的脆性金属间化合物是影响接头性能的关键因素。采用电子束直接熔化焊和阻隔熔化焊钛合金和不锈钢时, 接头界面会产生贯穿性裂纹导致焊缝直接断裂。电子束阻隔熔-钎焊中利用熔化的不锈钢润湿未熔化的钛合金母材, 并采用 Ag、Cu 作为中间层添加元素, 在结合界面处形成了很好的阻隔屏障, 减少了 Ti/Fe 界面的金属间化合物的产生, 减缓了应力, 实现了钛合金与不锈钢的冶金结合, 接头抗拉强度约为 100 MPa。电子束阻隔熔-钎焊得到的钛合金/不锈钢异种金属焊接接头焊缝正反面成形良好, X 射线探伤未发现裂纹和气孔缺陷。

关键词: 电子束焊接; 钛合金; 不锈钢; 阻隔镀层

中图分类号: TG456.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)01-0299-06

钛及钛合金以其良好的工艺性能和使用性能, 作为重要的轻质结构材料, 将逐渐部分替代钢和铝合金^[1,2]。由于钢在力学性能、焊接性、热稳定性等方面的优良性能, 在实际应用中, 往往采用“钛与钢”的复合结构来兼有两种材料的优点, 最大限度的降低成本和提高性能^[3,4]。

但是由于钛/钢热物理性能差异导致其焊接性非常差, 易产生缺陷和大的残余应力; 同时化学性能的差异导致焊缝中出现成分偏析以及生成脆性化合物。通常采用胶接、钎焊、扩散焊和爆炸焊等方法对钛/钢金属进行连接。如钛/钢钎焊一般采用 Ag 基钎料 (Ag-Cu-Ti、Ag-Cu-Ti-In 等) 和 Ti 基钎料, 钎焊接头剪切强度一般在 120~180 MPa, 接头使用温度较低, 耐蚀性较差^[5-8]。钛和钢的直接扩散焊连接同样由于界面脆性相的生成而无法直接进行, 在其连接界面添加单一中间层 (如 Ag、Ni、Al 等) 无法显著增加接头的强度。但是通过添加复合中间层 (Cu-Nb、V-Cu、V-Cr-Ni 等) 可以彻底消除接头中的金属间化合物, 实现接头组织的最优过渡, 从而使接头强度显著提高, 最高的接头强度可提高至 300 MPa 以上^[9,10]。而爆炸焊是制造钛-钢复合板的一种重要手段, 但对于对接等接头形式的构件则无法实现^[11]。上述几种方法无法避免接头使用温度低、叠加增重和接头形式受限等问题, 因此寻求一种可行的熔化焊工艺显得十分必要。

电子束焊接具有焊缝深宽比大、功率密度可调、焊接变形小等优点, 是当前大厚度、精密复杂及稀有昂贵结构、异种金属接头的主要焊接方法之一。采用电子束作为热源, 通过添加填充材料并对其体系进行合理的优化设计, 辅之以电子束能量耦合控制^[12-14], 可以从根本上解决 2 种材料的熔化焊接难题, 对异种难焊接头熔化焊接的解决具有重要的理论意义。

本实验拟利用能量高度集中、热影响区极小的电子束热源, 通过在连接界面电镀金属薄膜 Ag 和 Cu, 控制脆性金属间化合物的生成和分布, 来阻隔熔化和阻隔熔钎连接钛合金和不锈钢, 研究镀层金属对钛合金与不锈钢的界面和接头性能的影响, 为实现钛合金/不锈钢的有效连接提供有益的参考。

1 实 验

试验用钛合金材料为 TC4, 不锈钢材料为 HR-2, 化学成分见表 1。焊接试件尺寸为 150 mm×100 mm, 不锈钢厚度为 4 mm, 钛合金厚度分为 4 mm 和 2 mm 2 种。电子束焊前, 在一部分不锈钢试件表面电镀 Ag 和 Cu 金属薄膜, 镀层厚度为 10 μm, 希望通过过渡金属的添加在接头结合界面上起到一定阻隔作用, 避免熔化的两种金属直接发生反应而生成脆性化合物。

焊接采用的 2 种接头形式见图 1 所示, 分别为等厚度对接焊和有高度差的熔钎焊。在电子束熔-钎

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金 (51105346)

作者简介: 王亚荣, 女, 1978 年生, 博士, 高级工程师, 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621900, 电话: 0816-2484697, E-mail: wang_yarong@126.com

表 1 钛合金与不锈钢母材的基本成分

Table 1 Chemical composition of TC4 and HR-2 (ω/%)					
HR-2	Cr	Ni	Mn	Si	Fe
	19~21.5	5.5~8.0	8~10	1.00	Bal.
TC4	Al	V	Fe	Si	Ti
	5.5~6.8	3.5~4.5	0.3	0.15	Bal.

焊中不锈钢板高于钛合金板。电子束流的束斑落在焊缝正中时为对中焊，束斑落在焊缝一侧为偏束焊。

焊接试件表面处理，对于不锈钢试件直接用丙酮清洗，去除表面油污；对于钛合金试件，需将钛合金试件放入酸性混合溶液中清洗后，用清水反复冲洗，之后丙酮浸泡，风干，保持试件表面的清洁与干燥，之后在高真空电子束焊机中进行焊接。

2 结果与讨论

2.1 钛合金与不锈钢的对接焊

对等厚度的钛合金与不锈钢进行不添加镀层的电子束焊接。焊接参数见表 2。

由于影响钛合金与不锈钢接头性能的关键问题为界面金属间化合物的产生与分布，考虑到金属间化合物形成一般需要一定孕育时间，因此焊接中采用低加速电压快速焊接，尽量减小液态熔池中 Ti 与 Fe 的作用时间。束斑位置对异种材料电子束焊接接头性能有很大影响，很大程度影响到两种材料的熔合比。考虑到 HR-2 钢的热导率 (13.2 W/m·K) 大概是 TC4 热导率 (6.3 W/m·K) 的两倍，束流应该偏向钢一侧，

但是若从减小焊接应力方面考虑，钛合金的线胀系数远小于不锈钢，故束流应偏向钛合金一侧，不知道这两方面的作用对于钛合金与不锈钢的焊接来说，哪个作用更显著，所以在试验设计中，束流向两侧金属都有偏移。试验结果发现不管怎样改变参数组合，都无法避免焊接裂纹的产生，见图 2 所示。裂纹贯穿整个焊缝。由于是焊接完成后直接开裂，认为这是由于低塑性脆化导致接头开裂的冷裂纹。结合 Fe-Ti 相图分析其断裂的原因是异种材料非平衡冶金而产生的脆性金属间化合物损害了接头的塑性^[15-18]。

采用电子束直接对接焊连接钛合金和不锈钢很难避免接头脆性相的形成，无法实现连接。

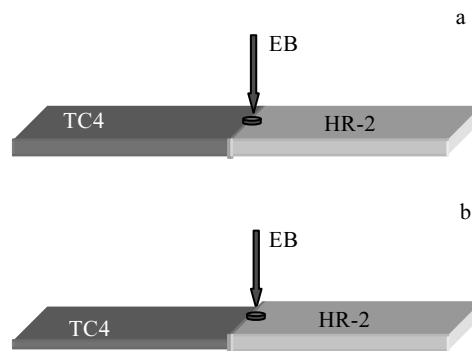


图 1 电子束流束斑位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the position of electron beam: (a) electron beam welding and (b) electron beam weld-brazing

表 2 等厚度 TC4/HR-2 电子束焊接参数

Table 2 Electron beam welding parameters

Acceleration voltage, U/kV	Electron beam, I/mA	Welding speed, V/mm·min ⁻¹	Scan frequency, f/Hz	Offset distance, d/mm	Focal
60	22	950	1000	0	Focus
60	27	950	1000	0	Defocus
60	27	950	1000	0.2(TC4)	Defocus
60	27	950	1000	0.2(HR-2)	Defocus

2.2 钛合金与不锈钢的镀层阻隔焊

在钛/钢基材之间额外加入合适的中间层，选择与 Fe 有一定固溶度的 Ag、Cu 做中间镀层，利用这两种金属良好塑性，来减弱钛和钢的热强性，使接头能够较容易地发生塑性变形，同时中间层材料易于发生塑性变形能够促进材料表面紧密接触，抑制钛合金和不锈钢的强烈互作用，利用镀层金属在焊接过程中避免或减少熔融金属 Ti/Fe 在界面之间的反应，以利于钛合金与钢实现连接。焊接参数见表 3。接头在焊接后直接断裂，如图 3 所示。

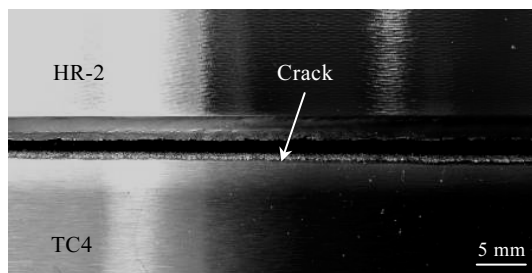


图 2 TC4/HR-2 电子束焊接接头

Fig.2 TC4/HR-2 weld of electron beam

表 3 镀层阻隔焊接参数

Table 3 Electron beam isolation welding parameters

Isolation layer	Acceleration voltage, U/kV	Electron beam, I/mA	Welding speed, V/mm·min ⁻¹	Offset distance, d/mm	Focal
Cu	60	27	950	0	Defocus
Cu	60	27	950	0.25(TC4)	Defocus
Cu	60	27	950	0.25(HR-2)	Defocus
Cu	60	27	950	0.5(HR-2)	Defocus
Ag	60	27	950	0.5(TC4)	Defocus
Ag	60	27	950	0.5(HR-2)	Defocus

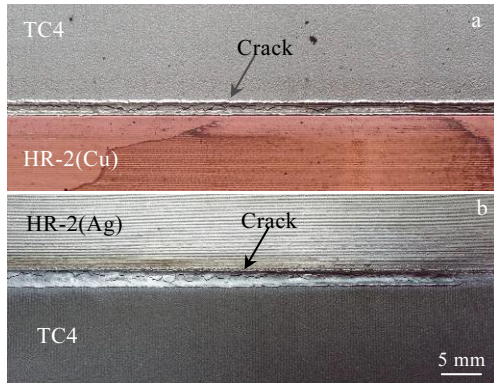


图 3 TC4/HR-2 阻隔镀层电子束焊接接头

Fig.3 TC4/HR-2 welds of electron beam isolation welding: (a) electroplated Cu and (b) electroplated Ag

无论镀层金属为 Cu 还是 Ag, 改变不同的偏移距离来控制熔化区内金属的融合比, 均未能实现连接, 对断裂接头的宏观断口进行观察, 见图 4 所示。不同镀层和偏移距离下焊接的对接试板均发生了贯穿整个焊缝的断裂, 但是其断面存在明显的差别。

随着偏移距离的增大, 由 0.25 mm 增大到 0.5 mm 后, 整个宏观断口表面由有金属光泽的白亮区断面转变为暗灰色断面。并且当电子束流偏向钛合金侧焊接时, 整个断口表面为光亮的金属化合物层, 而当电子束流偏向不锈钢侧焊接时, 断口上有金属光泽的脆性相减少, 断面整体呈现出暗灰色。金属光泽区域面积的减小, 暗灰色区域面积的增加是有利于接头实现连接的, 由此推断要实现钛合金和不锈钢的连接, 电子束流应该远离钛合金一侧, 而偏向不锈钢一侧, 同时偏移距离应该不小于 0.5 mm, 以进一步减小 Ti 元素在熔化的钢溶液中的含量。

2.3 钛合金与不锈钢的镀层阻隔熔钎焊

利用电子束阻隔熔-钎焊这种方式将更有利于钛合金与不锈钢的连接, 电子束流作用在高出钛合金试板的不锈钢板一侧, 利用熔化的不锈钢钢液去润湿钎接钛合金, 在一定程度上可以大幅减小钛元素的熔化量, 同时束流的偏移距离加大至 0.8 mm, 以使界面

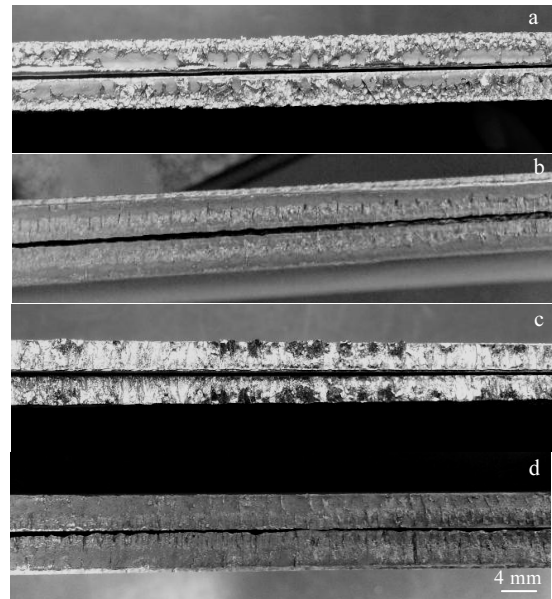


图 4 TC4/HR-2 阻隔镀层电子束接头断面

Fig.4 TC4/HR-2 welds fracture of electron beam isolation welding: (a) 0.25 mm beam off-set to HR-2 side electroplated Cu, (b) 0.5 mm beam off-set to HR-2 side electroplated Cu, (c) 0.5 mm beam off-set to TC4 side electroplated Ag, and (d) 0.25 mm beam off-set to HR-2 side electroplated Ag

电镀的金属可以很好地起到阻挡、稀释的作用。焊接参数见表 4 所示。

镀层金属为 Ag 和 Cu, 均实现了钛合金与不锈钢的连接, 见图 5 所示。接头表面形貌良好, 经 X 射线探伤未发现气孔、裂纹等缺陷, 按《JB4730-1994》标准, 焊缝为 I 级。

对电子束阻隔熔钎焊 TC4/HR-2 接头横截面进行分析, 见图 6 所示。从图中可以发现钛合金与不锈钢实现了冶金结合, 接头结合区域明显的分为 3 部分, 钛合金母材、熔化区 (MZ)、不锈钢母材。在不锈钢与钛合金的连接界面处可以清晰地看到分布相对集中的镀层阻隔层, 很好的隔离了钛合金区和不锈钢区, 一定程度上有助于抑制脆性相的产生。

表 4 镀层阻隔熔钎焊接参数

Table 4 Electron beam isolation weld-brazing parameters

Isolation layer	Acceleration voltage, U/kV	Electron beam, I/mA	Welding speed, V/mm·min ⁻¹	Offset distance, d/mm	Focus
Cu	60	27	950	0.8(HR-2)	Defocus
Ag	60	27	950	0.8(HR-2)	Defocus

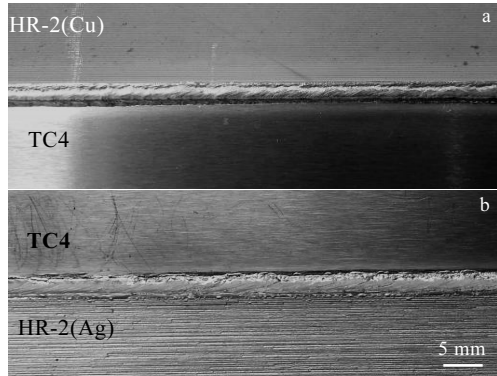


图 5 TC4/HR-2 电子束阻隔熔钎焊接头

Fig.5 TC4/HR-2 welds of electron beam isolation weld-brazing:

(a) electroplated Cu and (b) electroplated Ag

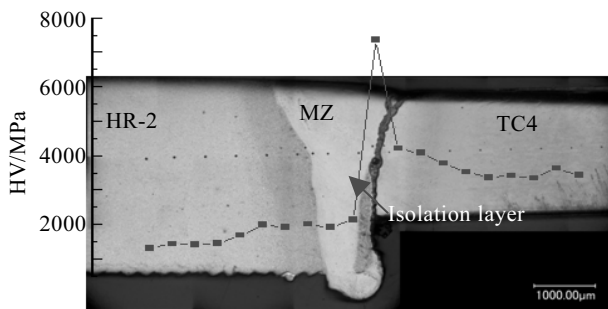


图 6 TC4/HR-2 (Ag)电子束阻隔熔钎焊接头形貌及硬度分布

Fig.6 Macrostructures and hardness distribution of TC4/HR-2 weld of electron beam isolation weld-brazing

对钛合金与不锈钢接头横截面沿水平方向测量显微硬度，结果见图 6 的红色分布曲线。

不锈钢一侧显微硬度由母材到热影响区逐渐升高，其数值均小于 2000 MPa，到接头熔化区显微硬度上升至 2100 MPa。在钛合金一侧的显微硬度亦是由母材向近缝的热影响区逐渐增加，硬度在 3500~4000 MPa。连接界面处显微硬度迅速增加，达到 7350 MPa，显著高于两侧母材，说明焊缝中生成的化合物塑性很差，硬度很高，这样脆硬组织的存在会降低接头的性能。

对钛合金与不锈钢的连接界面进行分析见图 7 所示。从图 7a 中发现连接界面呈现凹凸起伏咬合状，根据颜色和组织的不同分为 3 个区域，即 A 区、

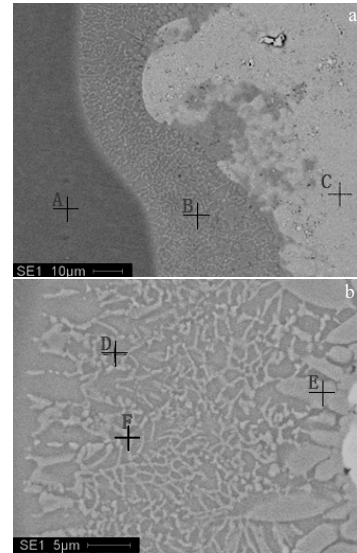


图 7 TC4/HR-2(Ag)电子束阻隔熔钎焊界面

Fig.7 Interface of TC4/HR-2 weld of electron beam isolation weld-brazing

B 区和 C 区，把 B 区放大，见图 7b 所示。对图中不同区域进行能谱分析确定其主要元素，见表 5 所示。

A 区为 TC4 一侧，Fe 元素含量很小，由 A 区到 B 区再到 C 区，Fe 元素的含量不断增加，而 Ti 元素的含量逐渐减少，C 区为靠近熔化区 (MZ) 一侧。在 B 区内部深灰色的 D 相被灰白色的呈网状分布的 F 相分割成大小不一的块状，D 相和 F 相的成分非常接近，应为钛基固溶体与 TiFe 化合物的共晶产物^[19]。E 相靠近 TC4/HR-2 的熔化区 MZ 区，Fe 元素含量进一步增大，呈现出大块齿状分布，根据 Ti 和 Fe 的原子比，很有可能是 TiFe、TiFe₂ 的混合物。

表 5 图 7 中连接界面不同区域的元素组成

Table 5 Elemental analysis of the interface in Fig.7 (at%)

Zone	Fe	Ti	Al	Si
A	0.91	89.19	9.89	-
B	28.49	63.94	7.57	-
C	80.31	17.04	2.65	-
D	26.95	64.25	7.44	1.36
E	35.10	56.59	7.64	0.67
F	23.65	68.09	8.27	-

对接头进行拉伸试验，试样断裂均发生在界面处，见图 8 所示。接头抗拉强度见图 9 所示，Ag 阻隔镀层的熔钎焊接头的抗拉强度为 45 MPa，Cu 阻隔镀层的接头抗拉强度为 100 MPa。

对接头断口进行分析，见图 10 所示。图 10a~10c 为镀 Ag 阻隔层接头的拉伸断口，图 10d~10f 为 Cu 阻隔层接头的拉伸断口，从接头的断口形貌来看，电镀 Ag 和电镀 Cu 的钛合金与不锈钢的接头均属于脆性断裂。在阻隔层为 Ag 的断口中发现纵横交错分布的裂纹，间隔间距大致相同，沿焊缝方向的裂纹之间的距离在 10~30 μm，垂直于焊缝方向裂纹间距有 30~40 μm。说明在镀层金属为 Ag 的钛合金与不锈钢的电子束焊接头内部不论是纵向，还是横向都存在着很大的焊接应力。在阻隔层为 Cu 的断口中发现裂纹主要沿垂直于焊缝的方向分布，平行于焊接方向上没有发现平行分布的裂纹，且裂纹的分布距离明显大于 Ag 阻隔层的接头，裂纹间距为 50~100 μm。由此推断，当利用 Cu 作为阻隔层时在一定程度上缓解了接头中的应力。这也是 Cu 阻隔层熔钎接头的强度高于 Ag 阻隔层接头的原因之一。

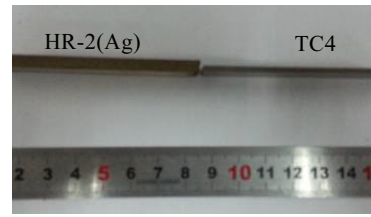


图 8 TC4/HR-2 电子束阻隔熔钎焊接头断裂位置

Fig.8 Fracture location of TC4/HR-2 welds of electron beam isolation weld-brazing

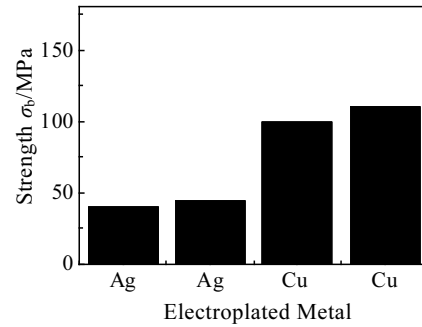


图 9 不同镀层金属对接头拉伸强度的影响

Fig.9 Effect of electroplated coating on tensile strength of the weld

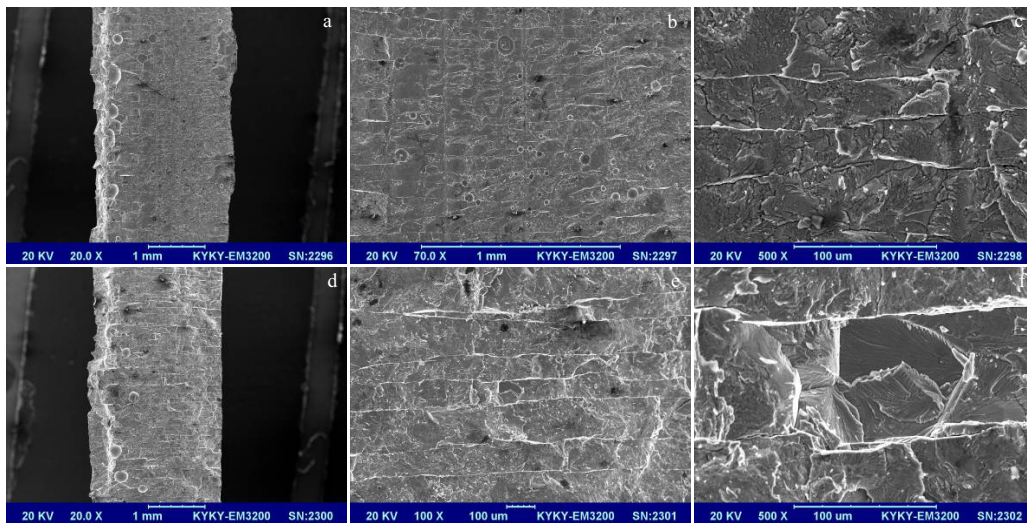


图 10 TC4/HR-2 阻隔层电子束熔钎焊接头断口形貌

Fig.10 Fracture morphologies of TC4/HR-2 welds of electron beam isolation weld-brazing: (a) macrostructure and (b, c) microstructure of weld electroplated Ag coating; (d) macrostructure and (e, f) microstructure of weld electroplated Cu coating

电子束阻隔熔钎焊的方法实现了钛合金与不锈钢的连接，但是接头强度和塑性还有待提高。在后续的工作中将持续关注界面结构的组成和组织分布的控制，以期进一步提高钛合金与不锈钢的接头综合性能。

3 结 论

1) 利用电子束直接熔化连接 TC4 钛合金与

HR-2 不锈钢，或利用 Ag、Cu 作为中间阻隔层材料电子束连接 TC4 钛合金与 HR-2 不锈钢，界面均产生大量的金属间化合物，使接头严重脆化，同时焊后残余应力非常之大，导致接头焊后直接断裂，因此钛合金与不锈钢的连接应从金属间化合物的抑制与焊接应力的控制两方面综合考虑。

2) 通过在不锈钢表面电镀 Ag、Cu 薄膜作为中

间阻隔层,通过电子束流向钢侧偏移,实现镀层金属对熔合界面中 Fe、Ti 元素的疏散、阻隔作用,一定程度上降低了钛合金与不锈钢连接时反应界面脆性金属间化合物产生的可能性,缓释了接头应力,实现了两种材料的冶金结合。

3)利用电子束阻隔熔-钎焊技术连接 TC4 钛合金与 HR-2 不锈钢,一方面利用熔化的不锈钢润湿钎接钛合金,减小焊接应力,另一方面,采用 Ag、Cu 镀层作为第 3 组元对接头中间界面进行冶金调控,目前实现了钛合金 TC4 与不锈钢 HR-2 的连接,接头强度最高达到 100 MPa。

参考文献 References

- [1] Wang S Q, Li W Y, Zhou Y *et al. Materials Science & Engineering A* [J], 2015, 78(1): 33
- [2] Wang Yarong(王亚荣), Teng Wenhua(滕文华), Yu Yang(余洋) *et al. Journal of Mechanical Engineering(机械工程学报)*[J], 2012, 48(20): 88
- [3] Kundu S, Sam S, Chatterjee S. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(15): 4910
- [4] Sun Z, Karppi R. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 528(15): 4910
- [5] Yue X, He P, Feng J C *et al. Materials Characterization*[J], 2008, 59(12): 1721
- [6] Qin Youqiong(秦优琼), Yu Zhishui(于治水). *Materials for Mechanical Engineering*[J], 2012, 36(11): 29
- [7] Dong Zhihong(董志红), Fan Hongyuan(范洪远). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2004, 32(3): 14
- [8] Lee M K, Lee J G, Choi Y H *et al. Materials Letters*[J], 2010, 64(9): 1105
- [9] Kundu S, Ghosh M, Laik A *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2006, A407(1-2): 154
- [10] Elrefaey A, Tillmann W. *Journal of Materials Processing Technology* [J], 2009, 209(5): 2746
- [11] Ma Dongkang(马东康), Zhou Jinbo(周金波). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 1999, 28(1): 26
- [12] Zhang Binggang (张秉刚), Wang Ting(王廷), Chen Guoqing(陈国庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(1): 129
- [13] Wang Ting, Zhang Binggang, Chen Guoqing *et al. Rare Metal Materials and Engineering* [J], 2011, 40(S4): 49
- [14] Lee H T, Jeng S L, Yen C H *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2004, 335: 59
- [15] Feng Jicai(冯吉才), Wang Ting(王廷), Zhang Binggang(张秉刚) *et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2010, 30(10): 108
- [16] Chen Shuhai, Zhang Mingxin, Huang Jihua *et al. Materials and Design*[J], 2014, 53: 504
- [17] Wang Yarong (王亚荣), Zhang Yongzhi(张勇志), Yu Yang (余洋) *et al. Rare Metal Materials and Engineering (稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(4): 875
- [18] Tomashchuk I, Sallamand P, Belyavina N *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 585: 114
- [19] Wang Ting(王廷), Zhang Binggang(张秉刚), Chen Guoqing(陈国庆) *et al. Transactions of the China Welding Institution(焊接学报)*[J], 2010, 31(5): 53

Effect of Isolation Coatings on Mechanical Property of Electron Beam Welding Joint of Titanium Alloy to Stainless-steel

Wang Yarong, Fan Yali, Yu Yang

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Electron beam welding, electron beam isolation welding, and electron beam isolation welding-brazing for the dissimilar combination of titanium alloy and stainless steel were studied. The results show that the brittle intermetallic compound formed in the welding process is the key factor to influence the joint properties. The penetrated crack is formed in the electron beam welding process and the electron beam isolation welding process directly leading to the unsuccessful joint. In the electron beam isolation welding-brazing process, the joints have the characteristics of welding and brazing and the metallurgically bonded joint is achieved without melting the titanium alloy sheet. Ag and Cu as filler material exhibit a good isolation layer which minimizes the formation of Ti/Fe intermetallics, and has a relaxation effect on the residual stress of the weld. The interalloying of dissimilar materials is well controlled, and a reaction zone is gained on the interface. The maximum tensile strength of titanium alloy/stainless-steel is up to 100 MPa. The welded seams are formed well in both sides of the joints and there is no crack and detected porosity in the joints through X-ray inspection.

Key words: electron beam welding; titanium alloy; stainless-steel; isolation coating

Corresponding author: Wang Yarong, Ph. D., Senior Engineer, Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, P. R. China, Tel: 0086-816-2484697, E-mail: wang_yarong@126.com